

УДК 621.182.3
Ш 79

РАСХОД ТОПЛИВА И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ СУДОВОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКИ С КАЙТОМ

В. П. Шостак, канд. техн. наук, проф.;
А. И. Кисарова, ассист.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Формализованы показатели расхода топлива и выбросов оксидов азота на единицу транспортной работы судна и на милю пройденного пути. Разработана блок-схема расчета этих показателей как вероятностных величин с использованием метода Монте-Карло для пропульсивных установок транспортных судов с кайтом. Приведены расчетные данные по эффективности применения кайта и оптимизации настройки малооборотного двигателя 6S50ME-C7 применительно к танкеру типа «Дмитрий Медведев» в круговых рейсах в Северной Атлантике.

Ключевые слова: расход топлива, оксиды азота, малооборотный дизель, кайт, танкер, метод Монте-Карло.

Анотація. Формалізовано показники витрати палива та викидів оксидів азоту на одиницю транспортної роботи судна й на милю пройденого шляху. Розроблено блок-схему розрахунку цих показників як імовірнісних величин з використанням методу Монте-Карло для пропульсивних установок транспортних суден з кайтом. Наведено розрахункові дані щодо ефективності застосування кайта та оптимізації налаштування малооборотного двигуна 6S50ME-C7 стосовно танкера типу «Дмитрий Медведев» у кругових рейсах у Північній Атлантиці.

Ключові слова: витрата палива, оксиди азоту, малооборотний дизель, кайт, танкер, метод Монте-Карло.

Abstract. Parameters of fuel consumption and emissions of nitrogen oxides on unit of transport work of a ship and on mile of the passed way are formalized. The block diagram of the calculation of parameters such as the probability values using the Monte-Carlo method for propulsion plants of cargo ships with a kite. The calculated data on the effectiveness of the kite and low-speed engine 6S50ME-C7 optimization settings with respect to the tanker type «Dmitry Medvedev» in the round voyage in the North Atlantic.

Keywords: fuel consumption, nitrogen oxides, low-speed diesel, kite, tanker, method of Monte-Carlo.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В связи с расширением грузовых перевозок морем увеличивается вредное влияние судовых пропульсивных установок (ПУ) на окружающую среду, потребление ими топлива и эксплуатационные затраты. В эксплуатационных затратах транспортного судна доминируют затраты на расходуемое на его движение топливо, несмотря на то что в настоящее время в качестве главных двигателей (ГД) используются дизели, чаще всего малооборотные – самые совершенные на данный момент тепловые двигатели, которые потребляют, как правило, наиболее дешевое из всех нефтяных топлив, а именно тяжелое топливо.

С целью снижения себестоимости морских перевозок реализуются мероприятия, направленные на повышение термодинамической эффективности ГД, т. е. на снижение удельного эффективного расхода топлива b , г/(кВт·ч), что сопровождается, согласно второму началу термодинамики, ростом верхней температуры цикла. Однако с ростом этой температуры увеличивается эмиссия оксидов азота NO_x . Их содержание в продуктах сгорания малооборотных дизелей (МОД), производимых в 90-х годах прошлого века, достигло $\xi_{\text{NO}_x} = 17$ г/(кВт·ч), что составляло примерно 10 % от расхода топлива. Оксиды азота, состоящие в основном из монооксида NO (95 %) и диоксида

NO_2 (~ 4 %), весьма токсичны (у человека вызывают удушье). Мировое сообщество было обеспокоено постоянно возрастающим количеством токсичных оксидов, выбрасываемых с судов, и для судов с закладкой килля после 01.01.2011 г. стали применять МОД с $\xi_{\text{NO}_x} \leq 14,5$ г/(кВт·ч). Такие МОД относятся ко второй категории токсичности – Tier II (ТII). К 2017 г. планируется применять на вновь строящихся судах пропульсивные установки с МОД, для которых $\xi_{\text{NO}_x} \leq 3,4$ г/(кВт·ч). В этом случае МОД с дополнительным оборудованием будет относиться к третьей категории токсичности – Tier III (ТIII). Совершенно очевидно, что себестоимость морских перевозок и вредное влияние судовой пропульсивной установки на окружающую среду определяются не удельными показателями b и ξ_{NO_x} , а абсолютными расходом топлива и выбросами NO_x . С технической точки зрения полезность транспортного судна определяется количеством перевезенного груза на некоторое расстояние, т. е. транспортной работой, измеряемой в тонно-милях. Соотношения между затратами и результатами всегда служили для выявления рациональной траектории развития технических систем.

Для решения ряда оптимизационных задач как при проектировании, так и при эксплуатации судов и их пропульсивных установок нужны методические

разработки и последующие формализованные процедуры, позволяющие оценивать последствия принимаемых решений, связанных с расходом топлива и загрязнением окружающей среды, прежде всего оксидами азота, по отношению к транспортной работе.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам непрерывного совершенствования судовых ГД как в плане расхода топлива, так и вредных выбросов с отходящими газами посвящено значительное число разноплановых публикаций, в большей части носящих констатирующий характер (например, [2, 3, 6 и др.]). Особенно большое количество публикаций в последнее время связано с выбросами оксидов азота [6, 7], а также серы. Снижение выбросов оксидов серы достигается применением топлив с меньшим содержанием серы. Токсичное воздействие судовых МОД на окружающую среду в некоторой степени может быть оценено общепризнанным (!) уравнением

$$\xi_{\text{NO}_x} = \frac{1}{100}(5\xi_{25} + 11\xi_{50} + 55\xi_{75} + 29\xi_{100}), \quad (1)$$

где ξ_{NO_x} – средневзвешенное содержание оксидов азота в отходящих газах, г/(кВт·ч); ξ_{25} , ξ_{50} , ξ_{75} и ξ_{100} – содержание этих же оксидов при нагрузках дизеля 25, 50, 75 и 100 %, г/(кВт·ч).

Как видим, предполагается, что ГД будет эксплуатироваться при этих нагрузках соответственно 5, 11, 55 и 29 % времени, что само по себе является весьма приближенным обобщением режимов эксплуатации транспортных судов, особенно если это касается пропульсивных установок с кайтом. Достижения в области имитационного моделирования сложных систем [4, 5] позволяют использовать показатели расхода энергоресурсов и токсичного воздействия на окружающую среду пропульсивных установок, которые гораздо ближе к объективной реальности. К нерешенным задачам в указанной проблеме можно отнести, в частности, отсутствие надлежащих методических разработок для определения количества топлива и вредных выбросов, приходящихся на единицу транспортной работы судна.

ЦЕЛЬЮ ДАННОЙ СТАТЬИ является анализ вредного влияния судовых пропульсивных установок с кайтом на окружающую среду и возможности оценки последствий принимаемых решений при реализации ряда оптимизационных задач как при проектировании, так и при эксплуатации судов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На рис. 1 схематично изображена рейсовая линия с портами A , B и C . Судно, находясь в порту A , получает заказ на транспортировку груза в количестве P из порта B до порта C . Следовательно, переход от A до B судно будет осуществлять в балласте, а от B до C – в грузу. Расстояние между портами (при движении судна по дугам большого круга – по ортодромии) составляет соответственно L_{A-B} и L_{B-C} , а длина рейсовой линии $L_p = L_{A-B} + L_{B-C}$. Суда движутся не по ортодромии, а по локсодромии [1], поэтому на рис. 1 сплошной ломаной линией показан маршрут судна в рейсе, состоящий, как пример, из восьми отдельных участков в общем случае разной протяженности. Протяженность некоторого отдельного участка обозначим l_j . Тогда путь, пройденный судном в рейсе, будет $S = \sum_{j=1}^8 l_j$. Всегда $S > L_p$. Различие между длиной рейсовой линии и пройденным судном путем зависит от капитана судна – лица, принимающего решения.

Полезная транспортная работа судна в рейсе

$$A_{\text{н.п.}} = PL_{B-C} = P\eta_r L,$$

где P – грузоподъемность судна; η_r – коэффициент использования грузоподъемности; $L = L_{B-C}$ – расстояние между портами загрузки и выгрузки по дугам большого круга.

Расход топлива ГД для осуществления рейса (для получения полезной транспортной работы) при условии, исключаящем форс-мажорные обстоятельства,

$$B_p = \sum_{i=1}^n N_e^c \left(\bar{N}_i \frac{l}{v_s} \right) i,$$

где n – количество участков рейсовой линии, на которых нагрузка на ГД и скорость хода судна не изменяются; N_e^c – спецификационная эффективная мощность ГД; \bar{N}_i – нагрузка на ГД на i -м участке; b_i – удельный эффективный расход топлива, который

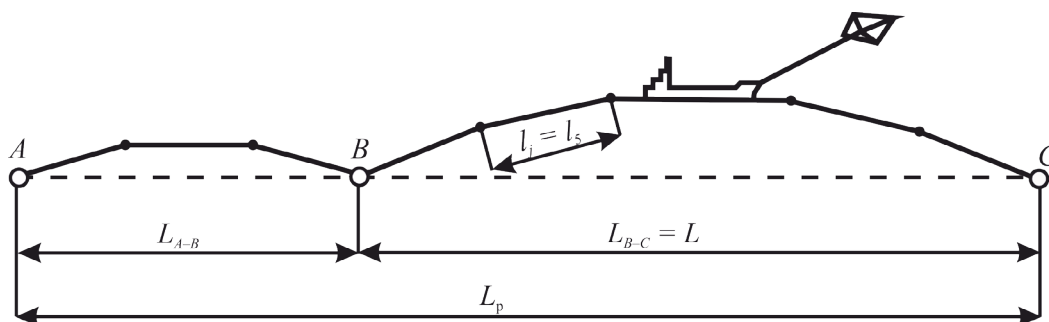


Рис. 1. Рейсовая линия и маршрут судна между портами A – B (в балласте) и B – C (в грузу)

соответствует \bar{N}_i ; l_i – путь, пройденный судном на i -м участке; v_{si} – скорость хода судна на i -м участке.

Скорость хода судна на каждом из участков рейсовой линии должна отвечать мощностным возможностям ГД, безопасности мореплавания и, в идеале (по крайней мере, в научно-исследовательских расчетах и т. п.), следующему условию:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{v_{si}} \right) = \text{const.}$$

Это условие вытекает из рациональной эксплуатации, когда работа судна согласуется с плановыми (договорными) сроками погрузочно-разгрузочных операций. В этом случае рейсовые стоянки или режим «судно в дрейфе» в ожидании этих операций – это нерациональное использование энергоресурсов и обосновательное дополнительное загрязнение окружающей среды токсичными выбросами с отходящими газами, что, естественно, заслуживает штрафных санкций, например, со стороны Международной морской организации (International Maritime Organisation – IMO).

Показателем рационального использования энергоресурсов, критерием сравнительной эффективности альтернативных проектных или управленческих решений относительно пропульсивных установок может выступать расход топлива ГД на единицу транспортной работы судна, г/(т·мили),

$$b_{\tau-m} = \frac{B_p}{PL} = \frac{1}{PL} \sum_{i=1}^n N_e^c \left(\bar{N} b \frac{l_i}{v_{si}} \right) = \frac{N_e^c}{P_r \eta_r L} \sum_{i=1}^n \left(\bar{N} b \frac{l_i}{v_{si}} \right), \quad (2)$$

где N_e^c выражается в кВт; P_r – в тоннах; L и l – в милях; b – в г/(кВт·ч) и v_s – в узлах.

Показатель, характеризующий загрязнение окружающей среды судовой пропульсивной установкой токсичными оксидами азота, по аналогии с предыдущим, будет иметь вид

$$\xi_{\tau-m} = \frac{N_e^c}{P_r \eta_r L} \sum_{i=1}^n \left(\bar{N} \xi \frac{l_i}{v_{si}} \right), \quad (3)$$

где $\xi_{\tau-m}$ – количество NO_x на единицу транспортной работы, г/(т·мили); ξ_i – удельное количество NO_x в отходящих газах ГД при нагрузке \bar{N}_i , г/(кВт·ч).

При решении ряда задач судовой энергетики, когда величины P_r и η_r могут быть приняты постоянными, в качестве показателей или критериев для оценки сравнительной эффективности альтернативных пропульсивных установок могут выступать расход топлива и количество выбросов NO_x на единицу пройденного пути, кг/милю:

$$b_m = \frac{10^{-3} N_e^c}{\sum_{i=1}^n l_i} \sum_{i=1}^n \left(\bar{N} b \frac{l_i}{v_{si}} \right); \quad (4)$$

$$\xi_m = \frac{10^{-3} N_e^c}{\sum_{i=1}^n l_i} \sum_{i=1}^n \left(\bar{N} \xi \frac{l_i}{v_{si}} \right). \quad (5)$$

Показатели или критерии сравнительной эффективности технических альтернатив лишь тогда имеют практическое значение, когда могут быть количественно определены. Оценим имеющиеся возможности относительно рассматриваемых задач, учитывая при этом, что мощность, развиваемая ГД в ходовом режиме, т. е. его нагрузка – величина переменная, это обусловлено изменчивыми гидрометеороусловиями на рейсовых линиях, разными шероховатостью подводной части корпуса судна и его осадкой в течение многолетней эксплуатации и другими факторами.

Что касается удельных показателей b и ξ , то разработки МОД предоставляют возможность получить необходимую информацию. Так, например, на рис. 2 изображены зависимости $\xi = f(N)$ по данным компании MAN Diesel & Turbo*. Нижняя кривая относится к МОД с большим удельным расходом топлива и частотой вращения, чем для МОД, кривые которого расположены вверх. Для «нижнего» МОД $\xi_{\text{NO}_x} = 11,5$, а для «верхнего» $\xi_{\text{NO}_x} = 14,9$ г/(кВт·ч). Верхние пересекающиеся кривые относятся к одной и той же марке МОД. Изменение функции $\xi = f(N)$ обеспечивается соответствующей «внутренней» регулировкой двигателя – путем изменения характера впрыска топлива, например, с помощью системы Common Rail. При этом меньшим значениям ξ соответствуют большие значения b . Отсюда следует: если предполагается работа МОД в основном при высоких нагрузках, то целесообразна настройка, дающая штриховую линию, что обеспечит меньший расход топлива в эксплуатации, а значение ξ_{NO_x} – по уравнению (1) – остается одним и тем же. Это само по себе лишено здравого смысла, поскольку загрязнение окружающей среды токсинами NO_x будет большим.

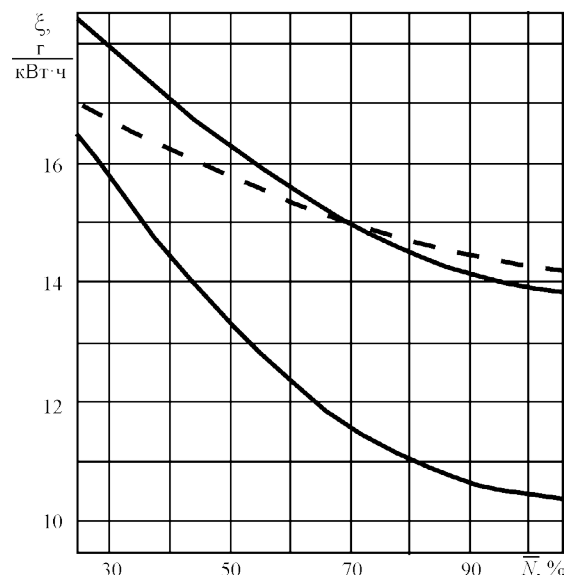


Рис. 2. Зависимость удельного количества NO_x от нагрузки МОД с разными термодинамической эффективностью и частотой вращения

*MAN Diesel & Turbo [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://www.mandieselturbo.com/ceas/index.html>.

На рис. 3 приведены зависимости удельного расхода топлива от нагрузки МОД с разной настройкой, полученные расчетным путем с использованием сервисной программы CEAS компании MAN Diesel & Turbo. Положение точки согласования (matching point) для настройки (tuning) двигателя L60MC-TI (рис. 3,а) весьма существенно влияет на удельный расход топлива. Так, например, понижение точки согласования на поле выбора рабочих параметров при постоянной относительной частоте $n_n = 98\%$ от относительной мощности $\bar{N}_n = 95$ до 65% при нагрузке двигателей около 50% сопровождается существенным снижением удельного расхода топлива, которое составляет $\Delta b_7 = 11,1$ г/(кВт·ч). Важной особенностью МОД является то, что при их дефорсировке или снижении точки согласования на поле выбора рабочих параметров нагрузка, которой соответствует наименьший удельный расход топлива b_{\min} , смещается в область меньших значений. Например, на рис. 3,б – от $\bar{N}_n = 66,6$ до $52,0\%$. Это указывает на то, что при проектировании пропульсивной установки крайне важно определиться с наиболее вероятными диапазонами нагрузок ГД, что возможно при наличии соответствующих программных продуктов, созданных на объективной методической основе и реальной информационной базе.

Величина \bar{N}_i , входящая в уравнения (2)–(5), зависит от многих факторов, часть которых имеет

случайную природу, и поэтому \bar{N}_i , а следовательно, и b_{T-M} , b_M и ξ_{T-M} , ξ_M – это случайные величины, значения которых колеблются в некоторых диапазонах со своими граничными значениями \bar{N}_{\min} , \bar{N}_{\max} , b_{T-M}^{\min} , b_{T-M}^{\max} , ξ_{T-M}^{\min} , ξ_{T-M}^{\max} , b_M^{\min} , b_M^{\max} и ξ_M^{\min} , ξ_M^{\max} . Особенно широкий диапазон значений \bar{N}_i будет в случае применения кайта (воздушного змея) [10, 11], который используется при определенных скоростях и направлениях ветра и, в зависимости от параметров ветра, имеет ту или иную тягу. Для транспортных судов с традиционными ПУ, когда тяга обеспечивается только ГД, в большинстве проектных задач, исходя из современной практики эксплуатации таких судов, можно использовать некое среднее значение нагрузки ГД. Однако это неприемлемо, когда используется кайт.

На рис. 4 представлена блок-схема вычисления b_M и ξ_M как индетерминированных целевых функций методом статистического моделирования (методом Монте-Карло), когда многократно имитируются различные гидрометеоусловия на рейсовой линии, техническое состояние корпуса судна и пр. – в соответствии с законами распределения значений вероятностных аргументов с использованием генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ), равномерно распределенных на отрезке от 0 до 1 [4, 5].

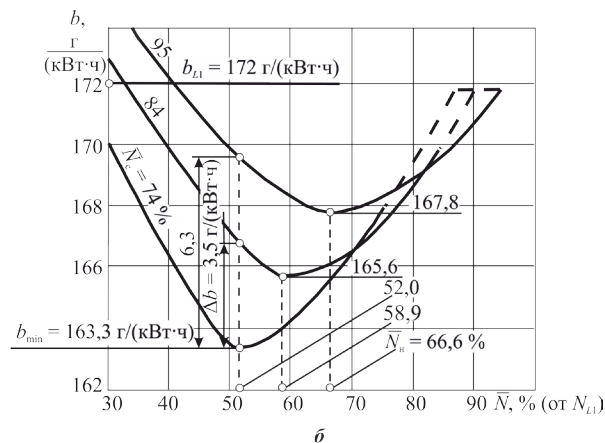
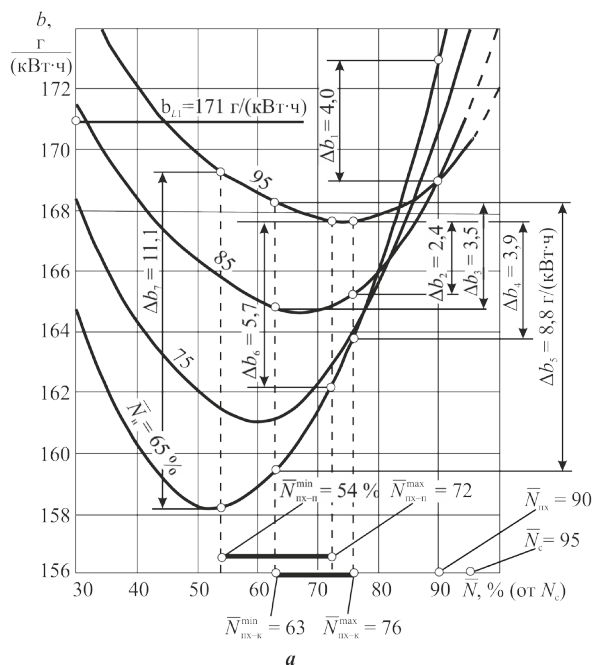


Рис. 3. Удельный расход топлива МОД в зависимости от нагрузки: **а** – двигатель L60MC-TI при $\bar{N}_c = 95\%$ и разных координатах точки согласования $\bar{N}_n = \text{var}$ и $n_n = 98\%$; **б** – двигатель S50ME-C7.1-THI при методе настройки High load и относительных:

спецификационной мощности $\bar{N}_c, \%$	–	74	84	95
частоте вращения $n_c, \%$	–	88	92	96

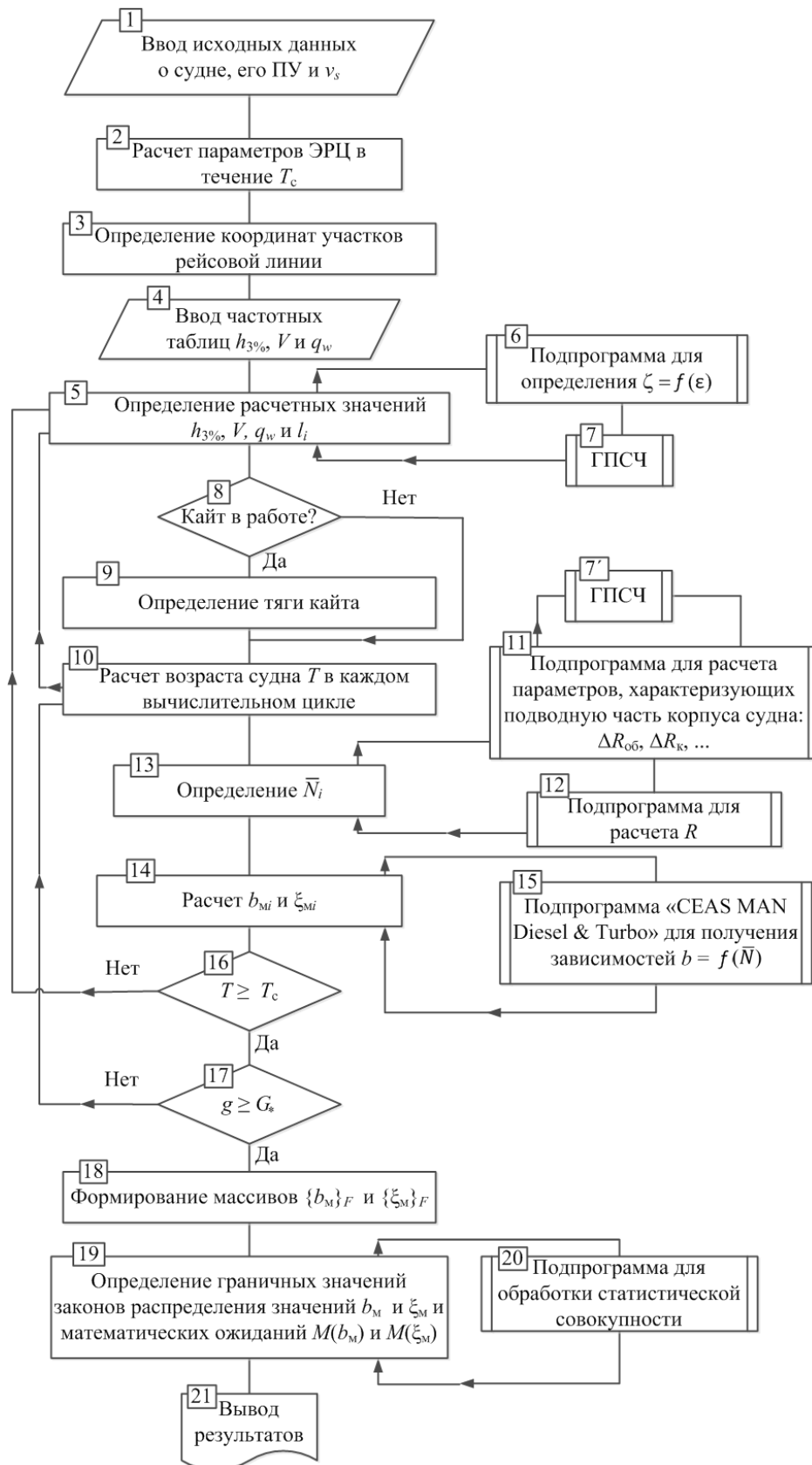


Рис. 4. Укрупненная блок-схема расчета топлива b_m и количества оксидов азота ξ_m на единицу пройденного пути транспортным судном

Основными исходными данными для вычислений являются технические параметры судна и его коммерческая скорость хода v_s – блок 1 (Б1). Параметры эксплуатационно-ремонтных циклов (ЭРЦ) определяются на протяжении всего срока службы судна T_c (Б2), что необходимо для оценки состояния внешней поверхности подводной части корпуса судна [6]. Участки рейсовой линии (Б3) – это рекомендованные маршруты между портами.

Мировой океан в плане гидрометеоусловий достаточно хорошо изучен. Он разделен на отдельные районы, для которых в разных официальных изданиях приводятся, в частности, сведения о законах распределения высот волн трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$, скоростей ветра V и их направлений q_w в виде частотных таблиц (Б4). В каждом циклическом расчете, обусловленном блоком 16 или 17, определяются одни из возможных значений $h_{3\%}$, V , q_w , l_i (Б5), для чего используется соответствующая подпрограмма (Б6), в которой по данным частотных таблиц рассчитываются массивы точек обратных интегральных функций распределения $\zeta = f(\varepsilon)$, где ζ – нормированные значения [5, 6], например высоты волн, скорости ветра и др., и ГПСЧ (Б7).

Если скорость ветра и его направление благоприятны для работы кайта (Б8), то рассчитывается его тяга (Б9). В зависимости от возраста судна (Б10) и времени, прошедшего после очередного докования, определяются дополнительные сопротивления от обрастания $\Delta R_{об}$ и коррозии ΔR_k (подпрограмма – Б11) как стохастические величины, для чего также используется ГПСЧ (подпрограмма – Б7б). Затем с помощью подпрограммы DRAG.EXE (Б12), созданной на кафедре ССЭУ НУК, рассчитывается полное сопротивление движению судна R , что служит основой для определения нагрузки на ГД \bar{N}_i на участке протяженностью l_i (Б13). Далее рассчитывается b_{mi} и ξ_{mi} на i -м участке (Б14). Для получения необходимого для этого расчета значения удельного расхода топлива – см. уравнения (2), (4) – используется сервисная программа CEAS компании MAN Diesel & Turbo, которая в данной блок-схеме выступает как подпрограмма (Б15) для получения зависимости $b = f(\bar{N})$ относительно МОД конкретной марки с некими дефорсировкой и настройкой.

Накопление рассчитанных значений расхода топлива и количества NO_x на единицу пройденного пути (Б14) обеспечивает формирование массивов $\{b_m\}_F$ и $\{\xi_m\}_F$ размерностью F (Б18), представляющих собой искусственно созданные статистические совокупности, которые с помощью подпрограммы (Б20), например «Subroutine OCC» [5], позволяют получить необходимые параметры искомых величин (Б19): b_m^{\min} , b_m^{\max} , ξ_m^{\min} , ξ_m^{\max} , законы распределения (в виде гистограмм, дифференциальных или инте-

гральных функций и т. п.), центральные моменты, в первую очередь математические ожидания $M(b_m)$ и $M(\xi_m)$. Аналогичным образом могут быть сформированы, при необходимости, массивы значений и других вероятностных величин (например, нагрузки ГД $\{\bar{N}\}_F$) и осуществлена их соответствующая обработка. В зависимости от поставленных целей на печать кроме указанных параметров могут быть выведены (Б21) также и значения многих других величин, участвующих в вычислительных процедурах. Затем расчет повторяется аналогичным образом (на блок-схеме не показано) на участках $i + 1$, $i + 2$ и т. д., каждый раз с новыми значениями $h_{3\%}$, V , q_w (Б5). Таким образом рассчитываются все последующие рейсы в течение всего срока службы судна T_c в соответствии с определенным ЭРЦ (Б2).

Когда возраст судна $T \geq T_c$ (Б16), то расчеты повторяются по второму жизненному циклу – $g = 2$, затем по третьему – $g = 3$ и т. д. (Б17). Принимаемое количество жизненных циклов G_* определяется из условия достаточности статистических испытаний [5], когда наступает стабилизация в определении параметров стохастических целевых функций.

Изложенный материал следует рассматривать как одну из возможных методических разработок, направленную на вычисление интегральных показателей b_m и ξ_m современных пропульсивных установок транспортных судов, которая после незначительных дополнений может быть пригодна и для расчета b_{t-m} и ξ_{t-m} . Это позволит решать задачи относительно рационального планирования, осуществления рейсов, оптимальных пропульсивной мощности и состава судовой энергетической установки и коммерческой скорости хода, совершенства процедур, связанных с индексом энергетической эффективности проекта (EEDI – Energy Efficiency Design Index) и эксплуатационным индексом энергетической эффективности судна, и пр.

Проиллюстрируем практическое применение этих методических разработок.

Нагрузка на ГД в режиме полного хода транспортного судна водоизмещением около 40 тыс. т может составлять от $\bar{N}_{пх-к}^{\min} = 63 \%$ до $\bar{N}_{пх-к}^{\max} = 76 \%$ (см. рис. 3,а) с использованием созданных и апробированных кайтов при условии сохранения постоянной скорости хода на рейсовой линии, а при использовании больших по площади кайтов в ближайшей перспективе – от $\bar{N}_{пх-п}^{\min} = 54 \%$ до $\bar{N}_{пх-п}^{\max} = 72 \%$. Различия в удельных расходах топлива Δb в результате разной настройки МОД могут оказаться весьма существенными, что зависит от его нагрузки.

Очевидно, существуют такие координаты настройки, когда суммарный расход топлива в течение срока службы будет минимальным. Отклонение от этих координат ведет к перерасходу топлива

и излишним выбросам NO_x . Например, при $\bar{N} = 90\%$ настройка двигателя на $\bar{N}_n = 65\%$ по сравнению с $\bar{N}_n = 95\%$ приведет к увеличению (к перерасходу) удельного расхода топлива на $\Delta b_1 = 4 \text{ г/(кВт·ч)}$, а при $\bar{N} = 54\%$ – к снижению (к экономии) этого расхода на $\Delta b_7 = 11,1 \text{ г/(кВт·ч)}$.

В соответствии с представленной блок-схемой была разработана математическая модель с наполнением необходимой информацией применительно к среднетоннажному танкеру типа «Дмитрий Медведев» с двигателем 6S50-ME-C7 (спецификационные мощность 9006 кВт и частота вращения 124,7 мин⁻¹) для кругового рейса в Северной Атлантике (табл. 1). Танкер типа «Дмитрий Медведев», основные характеристики которого представлены в табл. 2, был выбран потому, что он близок по размерениям к кон-

тейнеровозу «Белуга» (Beluga SkySails [10, 11]), по которому опубликованы основные экспериментальные данные, полученные благодаря натурным испытаниям его пропульсивной установки с кайтом 160 м² в рейсе протяженностью 12000 миль между портами Франции, Венесуэлы, США и Норвегии. С другой стороны, по танкерам типа «Дмитрий Медведев» (проект 15966, ЦКБ «Изумруд», СССР – Украина) имеются необходимые проектные данные, сведения о ходовых испытаниях, а программный продукт для определения сопротивления движению при разных гидрометеословиях DRAG. EXE (см. блок 11, рис. 4) скорректирован по результатам натурных испытаний этих танкеров на океанических переходах.

Таблица 1. Характеристики кругового рейса

Переход между портами	Тип груза или балласт	Расстояние, мили		Осадка танкера, м	Доля ходового времени по участкам между портами, %
		по ортодромии	по локсодромии		
Брест–Санта-Мария	Бензин	2107	2215	9,7	21,3
Санта-Мария–Ла-Гуайра	Балласт	2214	2700	6,3	24,5
Ла-Гуайра–Бостон	Нефть	1916	2040	10,4	21,7
Бостон–Брест	Дизельное топливо	2832	2870	10,0	32,5
Всего	–	9069	9825	–	100

В табл. 3 представлены некоторые характеристики гигантских воздушных змеев (кайтов) по данным немецкой компании «SkySails» [10, 11]. Применительно к таким кайтам по результатам реализации упомянутой математической модели в табл. 4 приведены некоторые сведения о топливоиспользовании и экологичности пропульсивной установки танкера типа «Дмитрий Медведев» на рейсовой линии «Брест (Франция) – Санта-Мария (Кабо-Верде, Африка) – Ла-Гуайра (Венесуэла) – Бостон (США) – Брест». Здесь за базовые значения приняты $M(b_m) = 73,48 \text{ кг/миля}$ и $M(\xi_m) = 6,17 \text{ кг/миля}$, когда координаты точки согласования совпадают со спецификационными мощностью и частотой вращения МОД. По отношению к этим значениям определены экономия топлива и снижение выбросов NO_x . Как следует из этой таблицы, по мере создания все больших кайтов положительный эффект от оптимизации настройки МОД возрастает и становится все более значимой рациональная настройка МОД.

Расчет производился при условии выполнения плановых сроков рейса (линейное судоходство) для любого возраста судна и при любых условиях мореплавания до наступления форс-мажорных обстоятельств. В этом случае скорость хода танкера составляла 13,7 уз, что на 1,2 уз меньше спецификационной скорости. Математическое ожидание нагрузки двигателя лежит в диапазоне 52,3...67,5 %. МОД, про-

Таблица 2. Основные параметры танкера «Дмитрий Медведев»

Параметр	Значение
Длина, м:	
между перпендикулярами	164,9
по грузовой ватерлинии	171,6
Осадка, м	11,0
Водоизмещение, т	38290
Скорость хода в полном грузу, уз	15,1

Таблица 3. Основные параметры кайтов применительно к разным судам

Кайт SS (SkySails)		Судно		
Площадь, м ²	Расчетная тяга, кН	Название или тип	Длина, м	Скорость хода, уз
160	80	Buoy Tender	54	11
320	160	MPP Heavy-Lift	133	14
640	320	Танкер	167	14

изводимые в настоящее время, могут быть настроены на три диапазона нагрузки: высокая нагрузка (High Load) $\bar{N} = 85\ldots 100\%$, частичная нагрузка (Part Load) $\bar{N} = 50\ldots 85\%$ и низкая нагрузка (Low Load) $\bar{N} = 25\ldots 75\%$. Таким образом, для ПУ с кайтом МОД может быть настроен на частичную нагрузку (Part Load). Для трампового судоходства нагрузка на ГД будет существенно выше.

Таблиця 4. Математические ожидания расхода топлива $M(b_m)$ и количества NO_x $M(\xi_{\text{NO}_x})$ и показатели эффективности применения кайта и оптимизации настройки двигателя 6S50ME-C7

Показатели	Площадь кайта, м ²			
	0 (без кайта)	160	320	640
Без оптимизации настройки МОД				
$M(b_m)$, кг/миля	73,48	67,42	64,00	58,09
$M(\xi_{\text{NO}_x})$, кг/миля	6,17	5,62	5,32	4,78
Экономия топлива, %	0	8,25	12,90	20,95
Снижение NO_x , %	0	8,91	13,78	22,53
С оптимизацией настройки МОД				
$M(b_m)$, кг/миля	72,81	66,06	62,30	56,30
$M(\xi_{\text{NO}_x})$, кг/миля	6,12	5,51	5,18	4,63
Экономия топлива, %	0,91	10,10	15,22	23,38
Снижение NO_x , %	0,81	10,70	16,05	24,96
Эффект от оптимизации настройки МОД				
Экономия топлива, %	0,91	1,85	2,32	2,43
Снижение NO_x , %	0,81	1,79	2,27	2,43
Оптимальные координаты точки согласования МОД:				
\bar{N}_n^{opt} (по отношению к $N_e^c = 9006$ кВт)	0,846	0,719	0,719	0,677
\bar{n}_n^{opt} (по отношению к $n_e = 124,7$ мин ⁻¹)	0,945	0,895	0,895	0,877
Математическое ожидание нагрузки МОД $M(\bar{N})$, %	0,675	0,615	0,577	0,523

ВЫВОДЫ

1. Расход топлива и количество выбросов NO_x судовым малооборотным дизелем, приходящиеся на единицу транспортной работы или на единицу пройденного пути, – это стохастические величины, которые могут служить критериями для принятия рациональных проектных или управленческих решений.

2. Представленная блок-схема и результаты, полученные при реализации имитационной математической модели, разработанной согласно этой блок-

схеме, свидетельствуют о том, что указанные в п.1 величины могут быть количественно определены, например, с помощью статистического моделирования.

3. Современная, рассмотренная в данной статье информационно-методическая база позволяет решать проектные оптимизационные задачи по рациональной настройке судового малооборотного двигателя, что обеспечит рачительное использование энергоресурсов и снижение токсичных выбросов с отходящими газами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Дмитриев, В. И.** Навигация и лоция [Текст] : учебник для вузов / В. И. Дмитриев, В. Л. Григорян, В. А. Катенин. – М. : Моркнига, 2009. – 458 с.
- [2] **Кокс, Г. А.** Современные принципы и направления создания транспортного поршневого двигателя [Текст] / Г. А. Кокс, В. А. Лашко // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Двигатели 2008» (Хабаровск, 15–19 сентября 2008 г.). – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2008. – С. 4–32.
- [3] **Николаев, Н. Н.** Контроль состава отработанных газов судового малооборотного двигателя MAN S-MC-C в эксплуатации [Текст] / Н. Н. Николаев, Н. Н. Зиненко // Журнал Университета водных коммуникаций. – СПб., 2010. – Вып. 4. – С. 52–57.
- [4] **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст] : [пер. с англ.] / Роберт Шеннон. – М. : Мир, 1973. – 418 с.
- [5] **Шостак, В. П.** Имитационное моделирование судовых энергетических установок [Текст] : монография / В. П. Шостак, В. И. Гершаник. – Л. : Судостроение, 1988. – 256 с.
- [6] **Шостак, В. П.** Моделювання зниження швидкості ходу транспортного судна протягом його строку служби [Електронний ресурс] / В. П. Шостак, В. І. Гершанік, А. І. Кісарова // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». – Миколаїв : НУК, 2011. – № 2. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/ua>.

- [7] **Aspholm, M.** Low NO_x Conversion of the of the Wartsila Vasa 32 [Text] / M. Aspholm // Wartsila NSD Marine News. – 1999. – Vol. 3.
- [8] **Goldsworthy, L.** Design of ship engines for reduced emissions of oxides of nitrogen [Text] / L. Goldsworthy // Motor Ship. – July, 2002. – P. 1–9.
- [9] Low Container Ship Speed Facilitated by Versatile ME/ME-C Engines [Text] // Engineering the Future – since 1758. – Denmark : MAN Diesel & Turbo, 2013. – P. 5–13.
- [10] **Elsner, R.** Simulating possible Savings of the SkySails-System on International Merchant Ship Fleets [Text] / R. Elsner, M. Schlaak, R. Kreutzer // Journal of Marine Engineering and Technology, 2010.
- [11] Testergebnisse des SkySails – Systems [Text] / S. Aschenbeck, T. Lenger, W. Szczesny, R. Kreutzer, M. Schlaak // Schiffbau & Schiffstechnik. Heft 1. – 2009. – Vol. 1. – P. 36–40.

© В. П. Шостак, А. І. Кісарова

Надійшла до редколегії 10.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013